

## DEMOSTRADOR TECNOLÓGICO DE TOBERA REALIZADA POR FSW A PARTIR DE CHAPAS LAMINADAS Y CONFORMADO PLÁSTICO POR REPUJADO

Lucas E. Feloy; Fernando Ruiz Diaz; Ernesto Maffia; Alfredo C González

UIDET ProInTec I&D, Departamento de Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, [lucas.feloy@ing.unlp.edu.ar](mailto:lucas.feloy@ing.unlp.edu.ar)

### INTRODUCCIÓN

En el proceso FSW una herramienta cilíndrica compuesta de dos cuerpos, el hombro y el pin, la cual gira a un determinado número de revoluciones, es introducida lentamente por una fuerza axial, entre la línea de unión de las dos chapas o placas a unir, las cuales se encuentran dispuestas a tope una con otra.

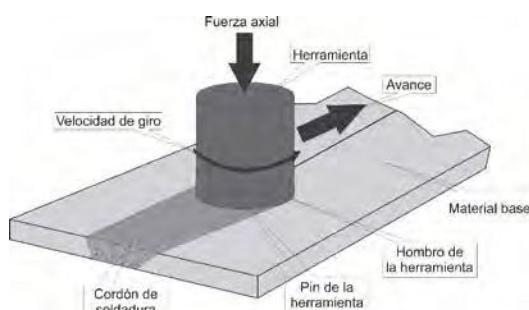


Figura 1: esquema de funcionamiento del proceso de soldadura por fricción-agitación.

El calor de fricción es generado por el contacto entre el hombro de la herramienta de soldadura giratoria con la superficie de las chapas a soldar y la deformación del material promovida por el pin de la herramienta. Este calor provoca un ablandamiento del material, sin llegar a la fusión, favoreciendo la deformación del mismo. El movimiento de rotación y avance de la herramienta promueve un flujo y mezclado del material desde un borde hacia el otro de la soldadura, lo cual conduce a la unión, en estado sólido, entre las dos piezas.

En aplicaciones a elevadas temperaturas como por ejemplo en cámaras de combustión y toberas de vehículos aeroespaciales se requiere el uso de aleaciones que permitan una elevada extracción de calor y buenas propiedades mecánicas. A lo largo de los años se han estudiado varias aleaciones base cobre que cumplen con estos requisitos, entre ellas: Cu-Cr, Cu-Ag, Cu-Zr, Cu-Cr-Zr, Cu-Ag-Zr, Cu-Cr-Nb, Cu-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, entre otras.

En lo que respecta a la fabricación a nivel industrial de cámaras de combustión y toberas surge el interrogante acerca del método de producción a utilizar. Por un lado se propone la realización de las piezas mediante el método de fusión y colado en molde de arena, mientras que por otro lado se sugiere utilizar un proceso de conformado plástico en caliente como por ejemplo el de forja con la finalidad de romper la estructura de colada, homogeneizar las propiedades del material y soldar posibles defectos provenientes de la fusión y colada.

En el presente trabajo se propone y pone a prueba un nuevo método de fabricación de toberas al cual se arriba gracias al desarrollo de aleaciones base cobre de mayor tenacidad conjuntamente con soldadura por batido: conformado plástico en frío. Se parte de una chapa laminada en frío, para luego rolarla y generar una virola cerrada longitudinalmente por la técnica de soldadura por batido. Una vez obtenida la virola se procede a deformar plásticamente en frío a través de un proceso de repujado para generar una disminución de sección de la virola que conformará la llamada garganta de la tobera, ubicada en el centro de la virola. El foco del trabajo se hace en el proceso de repujado que canalizará la deformación sobre la pieza, estudiando el impacto de diferentes conformaciones geométricas de las herramientas de repujado y variables tales como velocidad de giro y

deformación aplicada. . Al deformar a bajas temperaturas, se logra obtener un material con elevada acritud, presentando una mejora en su resistencia, logrando piezas de menor peso con un proceso de sencilla aplicación.

El repujado es un proceso de conformado de metal en el cual se da forma a una parte de simetría axial sobre un mandril o matriz mediante una herramienta redondeada o rodillo. La herramienta o el rodillo aplican una presión muy localizada (en casi un punto de contacto) para deformar el material de trabajo por medio de movimientos axiales o radiales sobre la superficie de la parte.

Resulta conveniente resaltar que esta técnica resulta netamente artesanal-experimental, es así que, en toda la bibliografía consultada, siempre se deja abierta las recomendaciones de la elección de los parámetros experimentales al operador, entiéndase por parámetros experimentales velocidad de giro de la pieza y forma de la herramienta a emplear en el repujado, como así también, la lubricación a utilizar.

## PARTE EXPERIMENTAL

El objetivo de este trabajo orientó las tareas hacia la creación de un demostrador tecnológico con forma de tobera de motor para la comprobación del método de fabricación. Estas tareas se pueden agrupar en tres grandes grupos, la conformación de las chapas y soldadura en condición plana, rolado y soldadura para cierre del cilindro, y, finalmente, conformado plástico de la tobera. A continuación, se detallan estos grupos de tareas.

La conformación de las chapas se realizó, luego de la colada del material, por medio de la laminación en caliente primero para luego terminarlás mediante laminación en frío. Para lograr obtener una chapa de dimensiones suficientes para cerrar el cilindro fue necesario generar múltiples chapas de menor longitud, debido a las capacidades técnicas del laboratorio para mantener la temperatura del proceso, fundamentalmente asociado esto a la capacidad del horno disponible.

El ajuste final, se realizó para llevar las chapas a un espesor de 3 mm mediante laminación en frío y tratamientos térmicos de recocido intermedios. Algunas de las chapas finales se muestran en la figura 2.



Figura 2: Chapas de Cu-Ag-Zr en proceso de laminación para alcanzar el espesor final de 3mm y luego ser soldadas por FSW.

Obtenidas las chapas en los espesores y medidas indicadas en el párrafo anterior se procedió a la soldadura. Se realizaron soldaduras planas, para lo cual, se tomaron tres chapas, en total dos soldaduras, que permitieron unir las tres chapas para completar con holgura la longitud necesaria para producir el aro de 200 mm de diámetro. En la figura siguiente se presenta una serie de fotografías de las chapas soldadas por FSW.



Figura 3: Fotografías correspondientes a las chapas de Cu-Ag-Zr soldadas por FSW para luego rolar un cilindro de 200 mm de diámetro.

Una vez producida las soldaduras la siguiente tarea consistió en el rolado de la chapa para producir el cilindro, el proceso de rolado fue llevado a cabo en etapas con el objetivo de evitar un exceso de deformación que pudiera afectar la integridad de las soldaduras. El proceso de rolado se cumplimentó en tres etapas y entre cada una de ellas se realizó un recocido de recristalización para luego continuar con el rolado y así hasta su forma final, esto es 200 mm de diámetro. El tratamiento térmico de recocido fue realizado en un horno eléctrico calefaccionado por resistencias, la temperatura aplicada estuvo entre 485 y 530 °C por el término de 1 hora y posterior enfriamiento al aire mediante rampa controlada.

Alcanzada la etapa antes descripta, se continuó con el ajuste final en cuanto al cierre del cilindro, luego del cual se procedió a la soldadura longitudinal.

En la Figura 4A se presenta uno de los cilindros en una vista externa en la zona de uno de los cordones longitudinales realizados para darle el largo necesario a la chapa para ser rolada. Dado que el apoyo del hombro de la herramienta produjo una inserción sobre el material dejando una marca demasiado pronunciada se procedió a realizar un esmerilado sobre dicha zona para evitar alguna concentración de tensiones en la misma. En la Figura 4B se indica la condición final del cilindro previo a ser conformado.

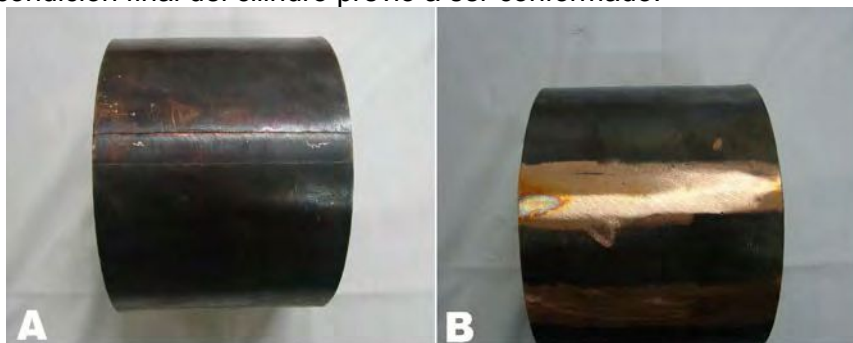


Figura 4: Vista externa de un cilindro cerrado con sus correspondientes soldaduras

Teniendo en cuenta que se contaba con dos cilindros fabricados en aleación Cu-Ag-Zr se realizaron las primeras experiencias de conformado con una herramienta fabricada en acero con la forma mostrada en la Figura 6A. El objeto de la forma fue el de aplicar una elevada presión en el punto de apoyo de la herramienta sobre el cilindro, si bien se logró deformar el cilindro, al ser tan localizada la deformación se producía en la superficie de apoyo de la herramienta una especie de surcos, esta deformación puntual llegó a producir la rotura parcial de la pieza sin lograr el tipo de deformación buscada, es decir, una reducción paulatina y creciente del diámetro.

En vista de los resultados antes indicados se decidió la modificación de la herramienta para ello se fabricó una nueva herramienta, confeccionada a partir de barras de aceros cuyo extremo fue terminado en forma semiesférica, el diámetro de la barra empleada fue y 25 mm, elegido aleatoriamente en base a los recursos disponibles. En la Figura 6B se muestra

la herramienta obtenida junto con el primer prototipo. El objeto de esta nueva forma de la herramienta estuvo centrado en el hecho de disminuir la presión puntual, como resultado de una mayor superficie de contacto entre la herramienta y el cilindro y de esa manera evitar zonas altamente deformadas, que se presentaban con la anterior herramienta.

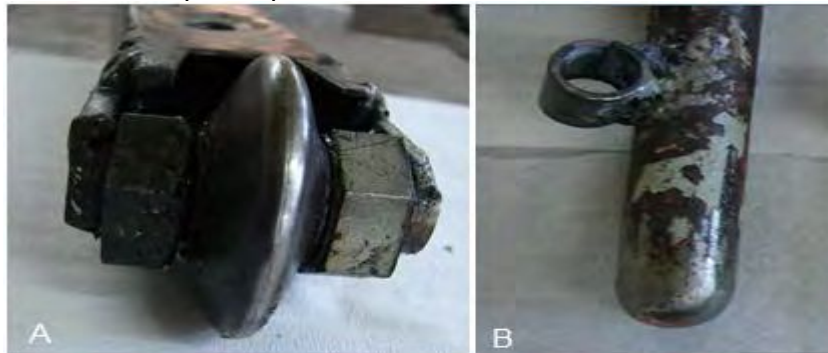


Figura 6: A) Esta herramienta dispone de una rueda cilíndrica en forma cónica que permita aplicar alta deformación puntual. B) Herramienta fija con el extremo terminado en forma semiesférica.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La primera experiencia realizada, con la herramienta cónica de baja superficie de contacto produjo una deformación altamente localizada, generando surcos que si bien concentran una gran tasa de deformación no producen la disminución de diámetro buscada. En la Figura 7 pueden observarse los resultados, juntamente con el defecto generado. Cabe destacar que el defecto es coincidente con un cordón de soldadura, evidenciando que el mismo no es capaz de soportar la concentración de tensiones producida.



Figura 7: Cilindro conformado, se observan “surcos” de deformación altamente localizada sin lograrse la reducción de diámetro buscado. Producto de esta situación se genera el defecto observado.

Los resultados obtenidos con las nuevas herramientas fueron altamente promisorios, lográndose darle forma al cilindro, debido a la forma semiesférica de la herramienta se logró deformar el cilindro, pero sin aplicar altas concentraciones de deformación, situación que sí se presentaba cuando se utilizó la herramienta con la rueda cilíndrica en forma cónica. Esta herramienta de extremo semiesférico, por su forma permite ir llevando la superficie de deformación del material de manera uniforme para finalizar las misma con una pequeña deformación mejorando notablemente la terminación superficial de la pieza.

En la figura 8 se presenta una serie de fotografías tomadas sobre uno de los cilindros repujados en diferente grado de avance del proceso, en la primera imagen se aprecia un grado de deformación inicial, y la superficie con algunas irregularidades debidas al proceso de repujado. En estas condiciones se sometió al cilindro a un tratamiento de recocido de recristalización durante una hora a la temperatura de 650°C. Una vez recocido se procedió a la limpieza del mismos, esto es, quitar la capa de óxido superficial y fue nuevamente



montado sobre la matriz y en el torno para continuar con el repujado y lograr la deformación uniforme observada en la figura de la izquierda.



Figura 8: Se presentan dos fotografías de distintas etapas del repujado. Superior corresponde a la primera etapa y la segunda luego del recocido de recristalización aplicado para darle el conformado final a la pieza.

## CONCLUSIONES

Una vez que las chapas fueron soldadas en posición plana, la etapa siguiente fue el rolado de las mismas, esta operación se pudo realizar de manera exitosa, habiendo soportado las chapas dicho proceso. Dado que el proceso de repujado se trata de una técnica artesanal experimental, la bibliografía consultada no precisa las variables a emplear en el mismo, dejando en consideración del operador la velocidad de rotación, la forma de la herramienta, como así también, el tipo de lubricante a emplear. Frente a esta situación se comenzaron a realizar una serie de pruebas de repujado con los dos cilindros fabricados en aleación Cu-Ag-Zr. La herramienta empleada, resultó no ser la adecuada, generando una importante deformación que llegó a fisurar las piezas.

En el proceso de repujado de los mismos se aplicaron cambios en la forma de la herramienta que produjeron una mejora notable en la técnica, habiéndose alcanzado piezas conformadas perfectamente sanas. Los parámetros empleados en el repujado fueron herramienta semicilíndrica de 25 mm de diámetro, velocidad de rotación de 180 rpm y lubricación grasa de litio.

Como punto de consideración a destacar es que el proceso tecnológico desarrollado, para obtener un demostrador tecnológico de tobera a partir de la técnica de conformado de un cilindro, cerrarlo mediante la técnica de soldadura por fricción-agitación y posteriormente repujado para llevar la pieza a su forma final; resulta factible de aplicación.

## BIBLIOGRAFÍA

1. **American Society for Metals.** *ASM Specialty Handbook, Aluminium and Aluminium Alloys*. 1996.
2. —. *Metals Handbook - Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special Purpose Materials*. s.l. : American Society for Metals, 1992. Vol. 2.
3. **American Welding Society.** *Welding Handbook*. 2007. Vol. 3.
4. **Adamowski, J. y Szkodo, M.** Friction Stir Welds (FSW) of aluminium alloy AW6082-T6. *Journal of achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. 2007, Vol. 20, págs. 403 - 406.
5. **Anancio-Filho, S. T., et al., et al.** Preliminary study on the microstructure and mechanical properties of dissimilar friction stir welds in aircraft aluminium alloys 2024-T351 and 6056-T4. *Journal of materials processing technology*. 2008, Vol. 206, pp. 132 - 142.
6. **Arora, A., DebRoy, T. and Bhadeshia, H. K. D. H.** Back-of-the-envelope calculations in friction stir welding - Velocities, peak temperature, torque, and hardness. *Acta Materialia*. 2011, Vol. 59, pp. 2020 - 2028.
7. **Arora, A., y otros, y otros.** Strains and strain rates during friction stir welding. *Scripta Materialia*. 2009, Vol. 61, págs. 863 - 866.

8. **Xu, S., y otros, y otros.** Finite element simulation of material flow in friction stir welding. *Science and Technology of Welding & Joints*. 2001, Vol. 6, 3, págs. 191 - 193.
9. **Vural, M., y otros, y otros.** On the friction stir welding of aluminium alloys EN AW 2024-O and EN AW 5754-H2. *Archives of Materials Science and Engineering*. 2007, Vol. 28, págs. 49 - 54.
10. **Ulysse, P.** Three-dimensional modelling of the friction stir welding process. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2002, Vol. 42, pp. 1549 - 1557.
11. **Threadgill, P. L., y otros, y otros.** Friction Stir Welding of aluminium alloys. *International Materials Reviews*. 2009, Vol. 54, págs. 49 - 93.